饱和砂土的三剪弹塑性边界面模型研究(三)——PFC3D数值试验验证

胡小荣,蔡晓锋,刘操

(南昌大学工程建设学院,330031 南昌)

摘　要:为进一步验证所提饱和砂土三剪弹塑性边界面本构模型的适用性,以南昌地区饱和砂土为研究对象,利用PFC3D颗粒流建立了单调及循环荷载作用下不同含泥量饱和砂土外裹柔性膜的常规三轴和真三轴数值试验模型。常规三轴条件下的室内试验、PFC3D模拟及理论模型间的结果对比验证了3者之间在固结排水时土的偏应力与轴向应变、轴向应变与体应变,以及固结不排水时土的偏应力与轴向应变、轴向应变与孔隙水压力之间的关系均具有较好的一致性,达到了可以进行数值试验的程度,表明所建PFC3D模型可以代替各种复杂加载条件下的饱和砂土室内试验。另外,将PFC3D真三轴固结不排水数值试验和理论模型间的结果作了对比,研究了不同含泥量饱和砂土的中间主应力影响问题。其中,在静真三轴固结不排水条件下,单调荷载下的PFC3D模拟与中间主应力影响系数$b=0.5$时的理论曲线整体吻合均较好,其曲线误差在轴向变形前期基本保持5%以内;在后续的动真三轴边界面理论模型验证时,循环荷载下的理论模型计算均采用了$b=0.5$。在动真三轴固结不排水条件下,PFC3D数值模拟和理论计算结果在应力-应变、循环次数-孔隙水压力关系曲线也比较吻合,含泥量越多应变发展速度越快、动剪切模量更小、滞回圈面积更大,孔隙水压的振动幅值和绝对值都随之变大。

关键词:饱和砂土;三剪弹塑性边界面本构模型;PFC3D数值试验;单调荷载;循环荷载

中图分类号:TU432　　　　**文献标志码**:A

Approaches to the triple-shear elasto-plasticity bounding surface model for saturated sands (3) —PFC3D numerical test verifications

HU Xiaorong, CAI Xiaofeng, LIU Cao

(School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, 330031 Nanchang, China)

Abstract: In order to verify the applicability of the triple-shear elastoplastic bounding surface constitutive model for saturated sands proposed previously, the conventional triaxial and true triaxial numerical test models using PFC3D were established for Nanchang saturated sands with different clayey contents wrapped in flexible membranes and bearing the monotonic and cyclic loading. Comparisons among the results from

收稿日期:2020-07-20　　　　**修回日期**:2022-02-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11362016;No. 10862004)

通信作者:胡小荣,教授。E-mail:huxiaorong@ncu.edu.cn

引用格式:胡小荣,蔡晓锋,刘操. 饱和砂土的三剪弹塑性边界面模型研究(三)——PFC3D数值试验验证[J]. 应用力学学报,2022,39(2):324-335.
HU Xiaorong, CAI Xiaofeng, LIU Cao. Approaches to the triple-shear elasto-plasticity bounding surface model for saturated sands (3)—PFC3D numerical test verifications[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(2): 324-335.

the laboratory conventional triaxial CD and CU tests, the PFC3D simulations, and the theoretical models showed good consistency in relationships existing in the deviatoric stress vs the axial strain and the axial strain vs the bulk strain under the CD conditions, and the same results existed in the deviatoric stress vs the axial strain and the axial strain vs the pore water pressure under the CU conditions. The conclusions mentioned above indicate that the numerical simulations with built PFC3D models can be used to verify the theoretical models replacing the laboratory tests for saturated sands under various complex loading conditions. In spite of that, results between the PFC3D true triaxial numerical tests and the theoretical models are compared to study the effects of the intermediate principal stresses for the saturated sands with different clayey contents. Because the curves deduced from the PFC3D simulation acting on the monotonic loads coincide with those from the theoretical models in the static true triaxial CU tests when $b=0.5$, giving the error within 5%, $b=0.5$ is adopted for all to cyclic load computations for theoretical models in the later true dynamic triaxial verifications to the theoretical models of bounding surface. Result comparisons between the PFC3D simulations and the theoretical models show good curve consistency in the stress vs the strain and the cycle times vs the pore water pressure under the dynamic true triaxial CU conditions. The greater clayey contents lead to the faster strain developing speed; the smaller dynamic shear moduli, the larger hysteresis loop areas, the greater vibration amplitudes and the absolute pore water pressures.

Key words: saturated sand; triple-shear elasto-plasticity bounding surface constitutive model; PFC3D numerical test verification; monotonic load; cyclic load

南昌地铁开挖并运行在饱和砂土层中,为了研究其在动静荷载作用下的力学特性,文献[1-2]提出了饱和砂土的三剪弹塑性边界面本构模型并做了常规动静三轴试验验证,结果表明理论模型与常规三轴试验结果较吻合;遗憾的是,未能对理论模型作相关的静、动真三轴试验验证。然而,该试验可能会因设备价格昂贵而难以实现;另外,试验工作量大、技术要求高。数值试验能从多角度去揭示材料的力学特性及破坏机理,可以代替各种复杂甚至是无法实现加载条件的室内试验。如果能合理地选用软件、正确地建立计算模型、准确地确定模型计算参数并经得起与典型真实试验及理论模型的验证,则可认为该计算软件下的模型达到了可进行数值试验程度,并接近真实试验,可以代替真实试验来验证理论模型[3-5]。

土体是由离散土颗粒为骨架组成的多相体,基于土颗粒尺度的三维颗粒流软件 PFC3D 在材料力学特性数值模拟方面得到广泛应用[6-16]。文献[9]分析了砂土的破碎特性对宏观力学特性的影响;文献[10-13]利用 PFC2D 分析了黏土和砂土的细观力学特性及破坏过程;文献[14]研究了微重力作用下振动容器中颗粒的输送问题;文献[15]探讨了无筋桩路堤中拱的荷载恢复机制,进行了数值和物理样本之间的效率响应、体积变形和位移特性的比较;文献[16]研究了溶胀颗粒状材料的孔隙度、应力状态和溶胀度之间的关系;文献[17]曾采用 PFC3D 对南昌地区饱和砂土做了单调荷载下的三轴试验模拟并与实际试验结果作了对比,但建模时采用了刚性墙去模拟真实试验中的橡皮膜,这与实际情况不符。

为进一步验证文献[1]所提饱和砂土三剪弹塑性边界面模型的适用性,在文献[1-2,17]基础上对南昌地区饱和砂土进行 PFC3D 数值试验验证。数值试验为单调荷载作用下不同含泥量饱和砂土外裹柔性膜的常规三轴固结排水和固结不排水试验和真三轴固结排水试验,循环荷载作用下动三轴和动真三轴的固结不排水试验。研究特点是:①数值试验中的饱和砂土外裹柔性膜模型能够模拟真实试验中的橡皮膜;②对文献[1]中的理论模型可进行较完整的动、静真三轴数值试验验证。具体内容如下。

1)PFC3D 数值模型建立及细观参数标定。采用并编写了 PFC3D 柔性外膜程序来更好地模拟真实三轴试验中土样的外裹橡皮膜,可以有效避免原有 PFC3D 数值模型中刚性墙所导致土样上下变形相同的缺点。数值模型中土样的细观参数以文献[2]的一部分室内三轴试验结果确定。

2)饱和砂土常规三轴试验结果对比。利用 PFC3D 数值模型来模拟文献[2]的其他室内常规三轴试验,并同时与文献[1]中的理论计算结果进行三者对比验证,以验证 PFC3D 建模及其土性细观参

数的可行性。

3)饱和砂土真三轴结果对比。采用内容2)验证了PFC3D数值模型和土性细观参数进行动静真三轴模拟,并与理论模型计算结果进行对比,以进一步验证文献[1]所提本构模型的正确性。

1 PFC3D模型建立及细观参数标定

1)基于文献[2]室内三轴试验的实际砂土情况和颗粒筛分试验结果。首先生成超过5 000个数值砂土颗粒,且砂土颗粒半径为实际砂土样的3.5倍[18-19]。数值砂土的初始孔隙率与室内三轴试验一致,均为0.3,依照饱和砂土含泥量的不同(0%、5%、10%)来设置砂土样体积占比,试验所采用的饱和砂土与数值砂土的级配曲线见图1。其中,X为小于某粒径土质量百分数,d为粒径。根据不同排水条件,分别进行固结排水试验(CD试验)和固结不排水试验(CU试验)[20]。针对试验过程中可能出现的模型加载速度突变而导致的因数值砂土受力不均而破坏的现象,采用的方法是:在柔性外膜内通过缩放砂土颗粒的大小以控制砂土颗粒不外溢,并且在后续的数值运算中每10次为一循环对砂土颗粒速度进行清零,从而确保计算稳定。

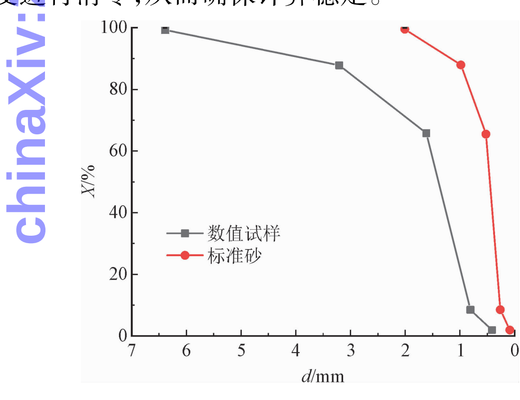


图1 饱和砂土与数值砂土的级配曲线

Fig. 1 Grading curves of saturated sands and numerical samples sands

2)饱和砂土的常规三轴试验数值模型建立。如图2所示,设置一个78.8 mm×78.8 mm×160 mm的长方体数值模型边界空间,根据文献[2]的饱和砂土试样实际尺寸在边界空间内建立直径为39.1 mm,高为80 mm的圆柱体土样。

3)砂土真三轴数值模型的建立。将常规三轴圆柱模型改为六面体模型,模型尺寸为80 mm×39.1 mm×39.1 mm,如图3所示,其他设置与常规三轴建模相同。

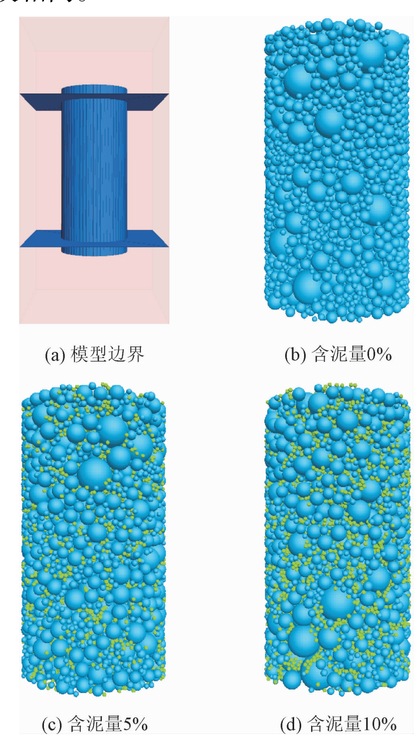


图2 常规三轴数值砂土试样模型

Fig. 2 Conventional triaxial sample models

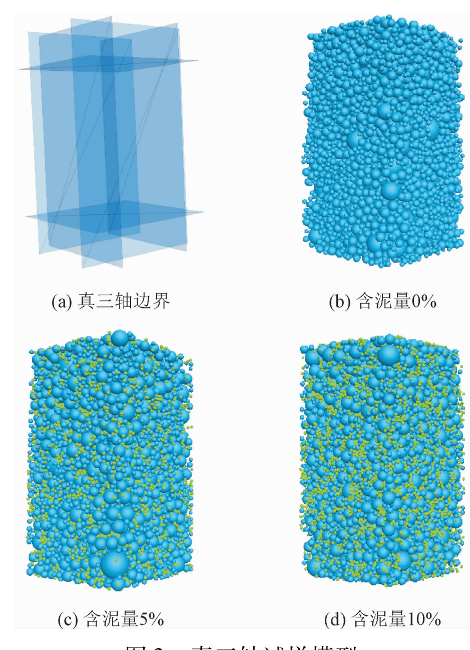


图3 真三轴试样模型

Fig. 3 True triaxial sample models

4)柔性外膜的建立。考虑到采用刚性墙的PFC3D数值模型会导致砂土在受力后发生沿侧向的均等变形,不符合常规三轴试验中土样受外裹橡皮膜约束时的柔性变形特征。为了保证PFC3D数值模型能够反映试验中橡皮膜的柔性加压功能,开发了PFC3D柔性外膜程序。其中,固结排水试验中的

柔性外膜模拟是以颗粒粒径为现实试验砂土最小颗粒粒径的 2/3 来生成柔性颗粒膜，采用接触黏结模型，以柔性外膜颗粒的初始位置不断循环来创建并排列好彼此相切的颗粒，如图 4(a) ~ 图 4(c) 所示。固结不排水试验中的柔性外膜则是在生成颗粒后在刚性墙的基础上内叠一层柔性外膜，两者共同组成数值砂土样的边界面，为了克服刚性墙无法嵌入接触这一问题，在加压过程中并不是以柔性外膜颗粒给予等效集中力，而是通过刚性墙来控制围压，如图 4(d) 和图 4(e) 所示。

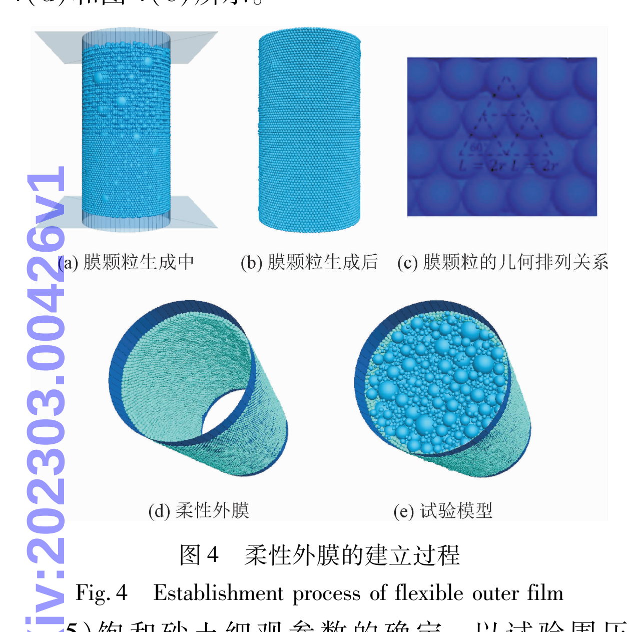


图 4　柔性外膜的建立过程

Fig. 4　Establishment process of flexible outer film

5) 饱和砂土细观参数的确定。以试验围压 200 kPa、含泥量 5% 的饱和砂土的循环动三轴试验 (取振动次数的前 20 次) 为对象进行细观参数标定，通过对砂土的接触刚度敏感性分析 (2×10^7 N/m、1×10^7 N/m 和 5×10^6 N/m) 以及柔性外膜颗粒的接触刚度敏感性分析 (5×10^3 N/m、1×10^4 N/m 和 2×10^4 N/m) 可知，采用泥颗粒刚度 1×10^6 N/m、砂颗粒刚度 1×10^7 N/m、以及柔性外膜颗粒刚度 2×10^4 N/m 时与试验结果最为匹配。由数值模型的阻尼敏感性分析 (0.4、0.7 和 0.9) 可知，阻尼设置为 0.7 时更为恰当。经过不断调整计算参数，饱和砂土样的最终 PFC3D 数值模拟细观参数见表 1。

利用表 1 所确定的饱和砂土细观参数来模拟试验围压 100 kPa 和含泥量 5% 的饱和砂土固结排水数值试验以及试验围压 200 kPa 和含泥量 5% 的饱和砂土固结不排水循环动三轴试验，PFC3D 的模拟结果与静、动三轴试验对比结果如图 5 所示。

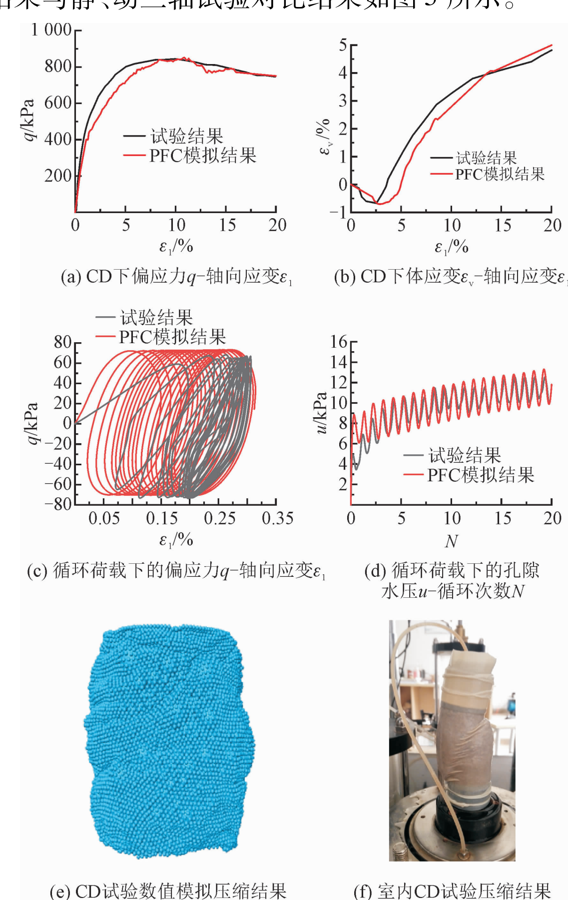


图 5　试验结果与模拟结果对比

Fig. 5　Comparisons between tests data and simulation results

表 1　砂土模型细观接触参数汇总

Tab. 1　Summary of meso contact parameters of sand models

接触对象	接触模型	法向接触刚度/(N·m^{-1})	切向接触刚度/(N·m^{-1})	法向黏结强度/N	切向黏结强度/N	摩擦系数	阻尼	密度/(kg·m^{-3})
砂	线性接触	1×10^7	1×10^7	–	–	0.70	0.7	2 600
泥粒	接触黏结	1×10^6	1×10^6	3×10^{200}	3×10^{200}	0.24	0.7	2 710
膜颗粒	接触黏结	1×10^4	1×10^4	1×10^{300}	1×10^{300}	0.70	0.7	1 000
墙	线性接触	1×10^7	1×10^7	–	–	0.70	–	–

由图 5(a) 和图 5(b) 可知，固结排水三轴试验结果与 PFC3D 数值模型模拟结果均较为接近，数值模型能较好地反映饱和含泥砂土的软化阶段以及体积收缩现象。由图 5(c) 和图 5(d) 可知，PFC3D 数值模型能够很好地模拟固结不排水循环动三轴试验的滞回圈，累积塑性应变和孔隙水压力随循环次数

的变化也较为一致。由图5(e)和图5(f)可知,在固结排水三轴试验中,PFC3D数值模拟所得土样剪切破坏形状与实际试验试样是相似的。上述结果表明本研究所建模型及所标定的模型计算参数是正确的,可用于对饱和砂土作进一步的力学特性分析。

2 饱和砂土常规三轴CD和CU试验结果对比

为了进一步验证本研究所建PFC3D模型的正确性,并将其作为数值试验机来验证文献[1]中理论模型的可能性,用所建PFC3D数值模型对围压分别为100 kPa、200 kPa和400 kPa、含泥量分别为0%、5%和10%的饱和砂土做了固结排水(CD)与固结不排水(CU)试验模拟,并与室内试验和理论计算结果做了对比。模型采用圆柱体,通过用Fish语言代码编程实现如下加载:首先在相应的排水条件下,对PFC3D数值土样的3个方向同时加载,直至目标最小主应力;待完成固结后,保持目标最小主应力大小不变,在竖直方向分次加载至目标最大主应力,直至数值试样剪切破坏。其中,固结不排水模拟试验中的侧向围压增量视为实际试验中的孔隙水压。图6和图7为固结排水试验中轴向应变分别与偏应力、体应变的关系曲线,图8和图9为固结不排水试验中轴向应变分别与偏应力、孔隙水压力的关系曲线。

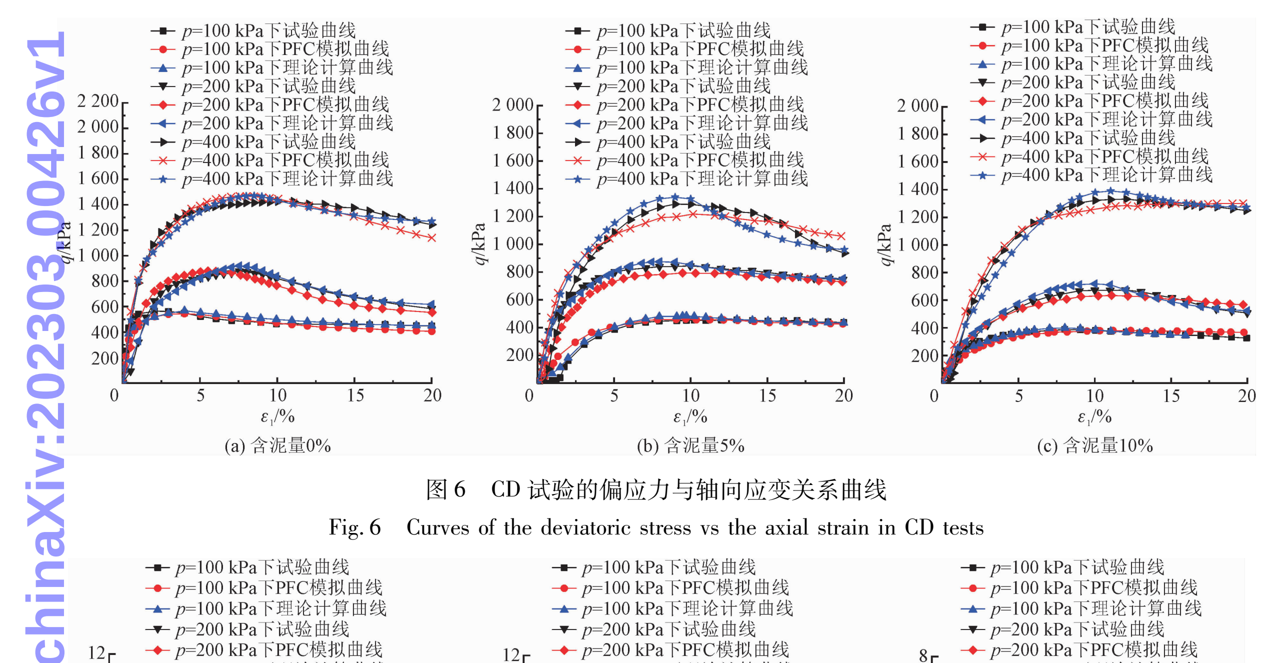


图6 CD试验的偏应力与轴向应变关系曲线

Fig. 6 Curves of the deviatoric stress vs the axial strain in CD tests

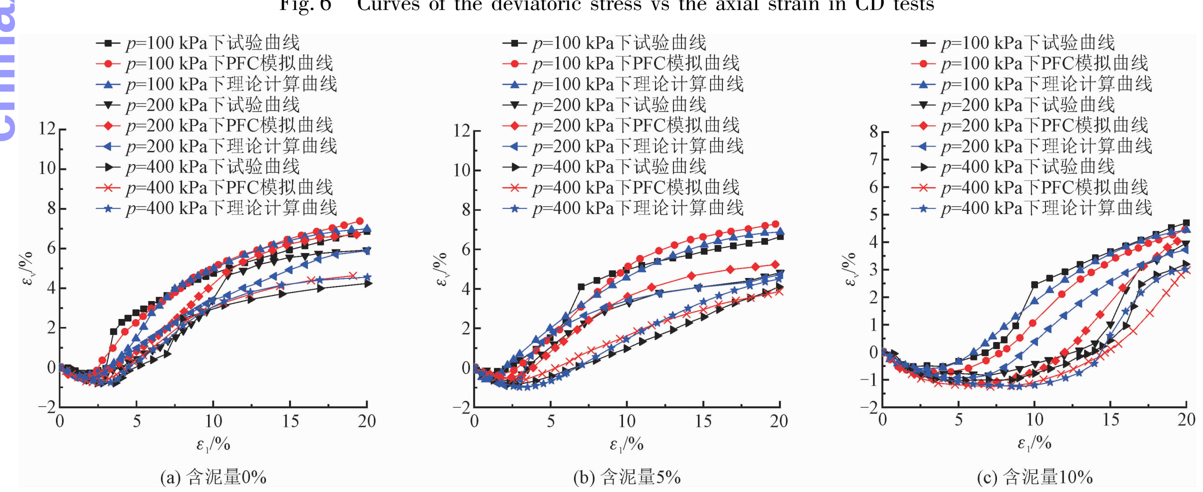


图7 CD试验的体应变与轴向应变关系曲线

Fig. 7 Curves of the bulk strain vs the axial strain in CD tests

由图6可以看以看出,PFC3D的固结排水模拟试验与理论和实际试验结果非常接近,能够较好地反映不同含泥量饱和砂土的软化特性,并与文献[21]的结果相同。由图7可以看出,固结排水模拟试验中的体应变模拟曲线与实际试验结果和理论计算结果也基本符合;对于不同含泥量和围压下的饱和砂土,其受力后的体积收缩和体积膨胀现象也能得到较好地体现。

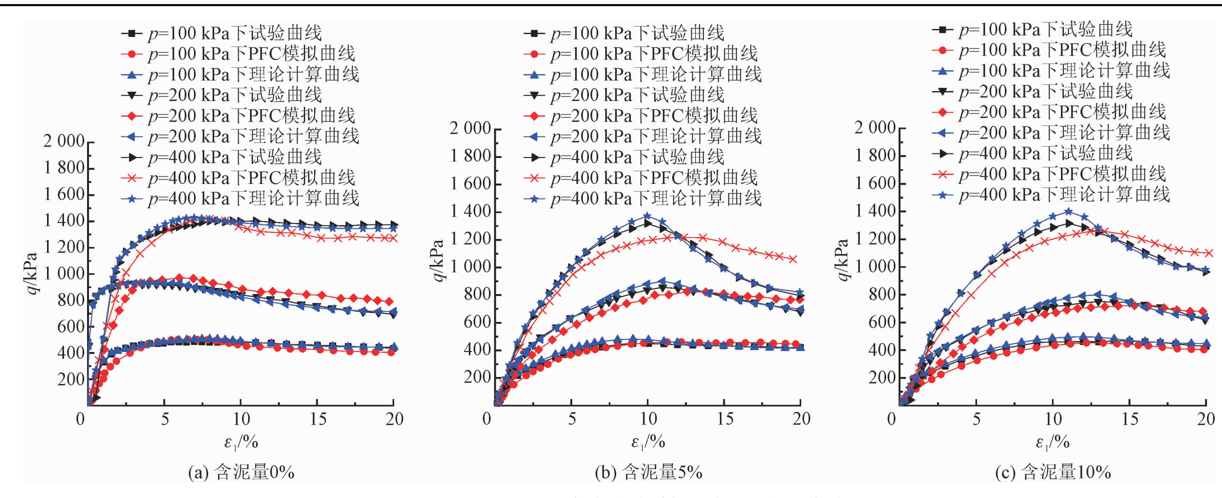




图 8　CU 试验的偏应力与轴向应变关系曲线

Fig. 8　Curves of the deviatoric stress vs the axial strain in CU tests

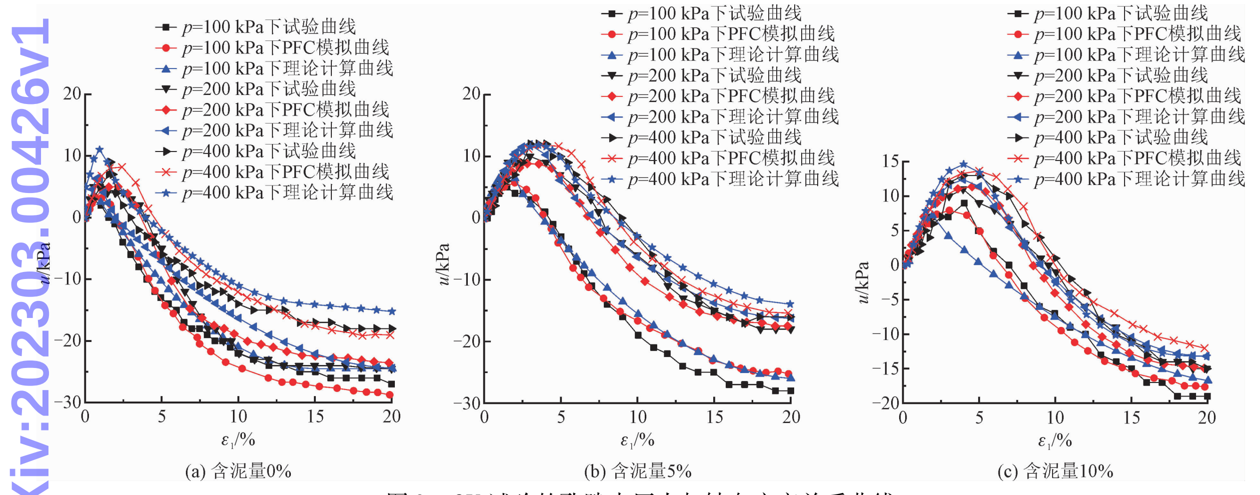


图 9　CU 试验的孔隙水压力与轴向应变关系曲线

Fig. 9　Curves of the pore water pressure vs the axial strain in CU tests

由图 8 可知，固结不排水试验的应力应变曲线相对要稍小一些。这是因为体积的不变会影响墙体的伺服控制，从而影响到偏应力的大小。由图 6 和图 8 可看出，在硬化阶段前期曲线基本都呈直线状态。由图 9 可知，在固结不排水模拟试验中孔隙水压模拟曲线与室内试验曲线和理论计算结果也较为一致，孔隙水压会随着围压和含泥量的变大而变大，并会出现负的孔隙水压。上述结果表明，针对所研究的饱和含泥沙土建立的 PFC3D 模型是正确的，并可作为文献[1]理论模型验证的数值试验机，用于理论模型的真三轴验证。

3　饱和砂土的真三轴 CU 试验结果对比及中间主应力影响系数的确定

将 PFC3D 所建立的模型在最小主应力 σ_3 = 200 kPa，中间主应力 σ_2 =300 kPa 下进行了固结不排水试验（CU 试验）真三轴数值模拟，将所得 PFC 模拟结果与文献[1]中的模型理论结果进行了对比，理论模型中间主应力影响系数 b 值分别取 0、0. 25、0. 50、0. 75 和 1. 00。图 10 和图 11 分别为真三轴固结不排水试验的轴向应变与最大主应力和中间主应力间的偏差应力 $\sigma_1-\sigma_2$ 以及轴向应变与孔隙水压力 u 间的关系曲线。

由图 10 和图 11 可知，PFC3D 的模拟结果也能较好地反映饱和含泥砂土的真三轴固结不排水加载特征，其变化规律与文献[1]的计算结果有较好的一致性。另外，由图 10 比较可知，PFC3D 的模拟结果与文献[1]的理论计算结果在中间主应力影响系数 b =0. 50 时，符合度最佳，其误差小于 5%。由图 11 比较可知，当含泥量为 0% 时，PFC 模拟曲线与 b =0. 50 时的理论计算曲线在整体上均符合较好，其误差不超过 5%；当含泥量为 5% 时，PFC3D 的模拟曲线与 b =0. 50 时的理论计算曲线在轴向应变小

于 12% 时都符合得较好，误差小于 3%，轴向应变大于 12% 后，误差有所扩大；当含泥量为 10% 时，PFC3D 的模拟曲线与 $b=0.50$ 时的理论计算曲线在加载前期（轴向应变小于 6% 左右）符合得较好，误差小于 6%，轴向应变大于 6% 后，误差有所扩大。通过综合比较图 10 和图 11 可知，对于南昌地铁饱和含泥砂土而言，在静真三轴条件下，文献[1]理论模型中的中间主应力影响系数取 0.50 较为符合。

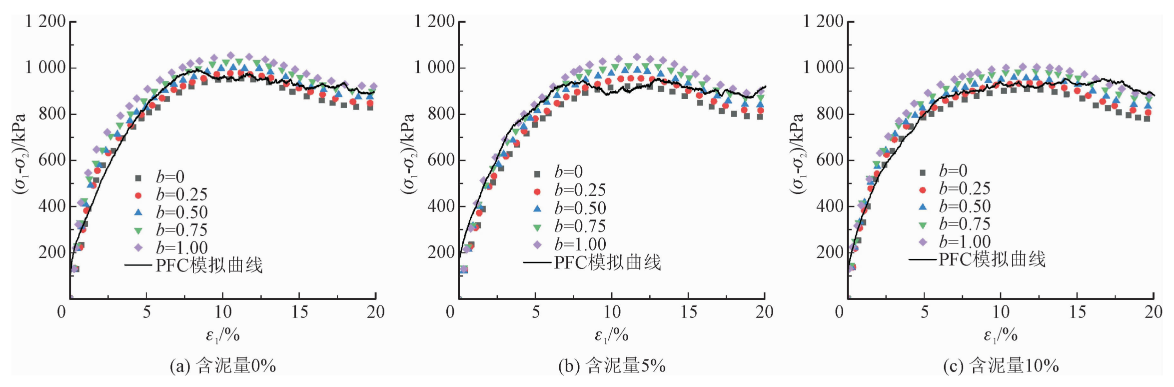


图 10　真三轴固结不排水的轴向应变与偏差应力 $\sigma_1-\sigma_2$ 间的关系曲线

Fig. 10　Curves of the axial strain vs the deviatoric stress $\sigma_1-\sigma_2$ in true triaxial CU tests

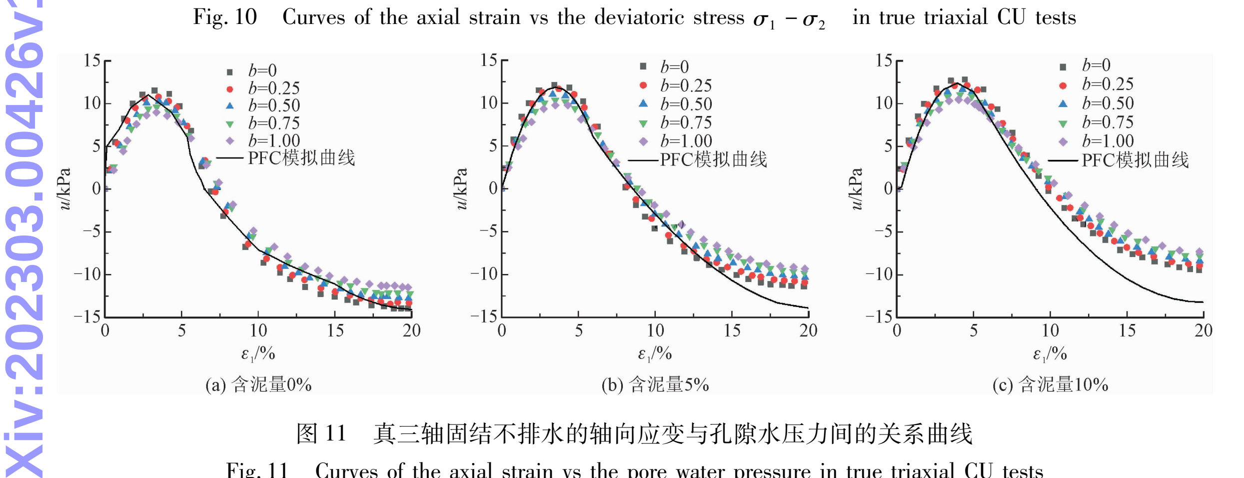


图 11　真三轴固结不排水的轴向应变与孔隙水压力间的关系曲线

Fig. 11　Curves of the axial strain vs the pore water pressure in true triaxial CU tests

4　循环动三轴和动真三轴数值 CU 试验验证

4.1　循环动三轴数值 CU 试验验证

考虑围压、振动频率、振动幅度以及饱和砂土含泥量等因素，进行了 PFC3D 循环动三轴 CU 试验模拟，并横向对比了文献[1-2]的理论计算结果和试验结果。在围压为 200 kPa、400 kPa，振动频率为 0.5 Hz、1 Hz 和 2 Hz，振动幅度为 30 kPa、40 kPa、50 kPa和70 kPa，饱和砂土含泥量为 0%、5% 和 10% 条件下，分别进行循环动三轴试验。由于对比曲线结果类似，限于篇幅仅列出 0%、5% 和 10% 的饱和砂土含泥量，围压为 400 kPa、振动频率为 1 Hz、振幅为 70 kPa 的数值模拟结果对比情况。取试验振动次数的前 20 次进行分析。

4.1.1　应力应变关系

图 12～图 14 为围压 400 kPa、振动频率 1 Hz 和振幅 70 kPa 时，含泥量 0%、5% 和 10% 的砂土对应的应力应变关系。

由图 12～图 14 可知，q-ε_1 关系均表现为随着循环加荷次数的增加，应变逐步紧缩、动剪切模量逐渐增大、滞回圈面积逐渐减小，循环稳定时割线模量、滞回圈面积均保持稳定。究其原因，在室内试验时，刚开始进行循环荷载时砂土颗粒分布、基础都不均匀，荷载传递下来的能量不能得到及时耗散；但随着荷载次数的增加，颗粒通过移动得到重新排列，接触更加均匀，耗能系统也更加完善，于是便出现了前期应变发展快后期均匀稳定的现象。相同条件下，饱和砂土的含泥量越高，相同应力条件下所发生的应变会更大一些。

4.1.2　孔隙水压的发展

图 15～图 17 为围压 400 kPa、振动频率 1 Hz 和振幅 70 kPa 时，含泥量 0%、5% 和 10% 的砂土对应的孔隙水压变化对比情况。

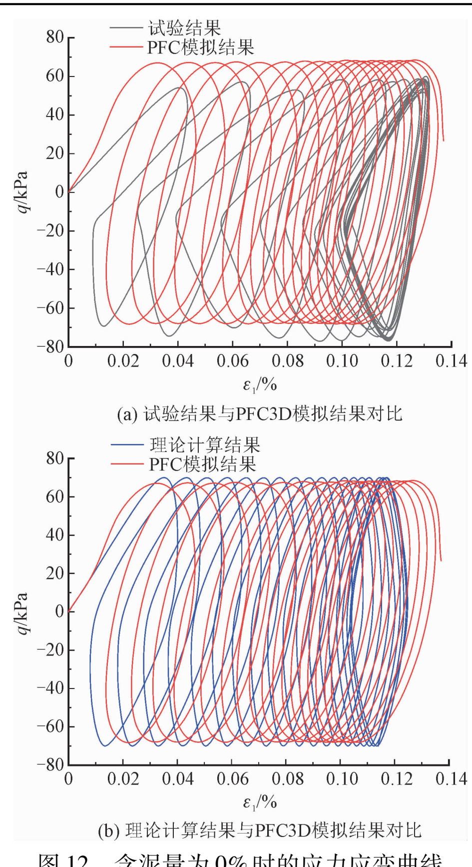


图 12　含泥量为 0% 时的应力应变曲线

Fig. 12　Curves of q-ε_1 with 0% clayey content

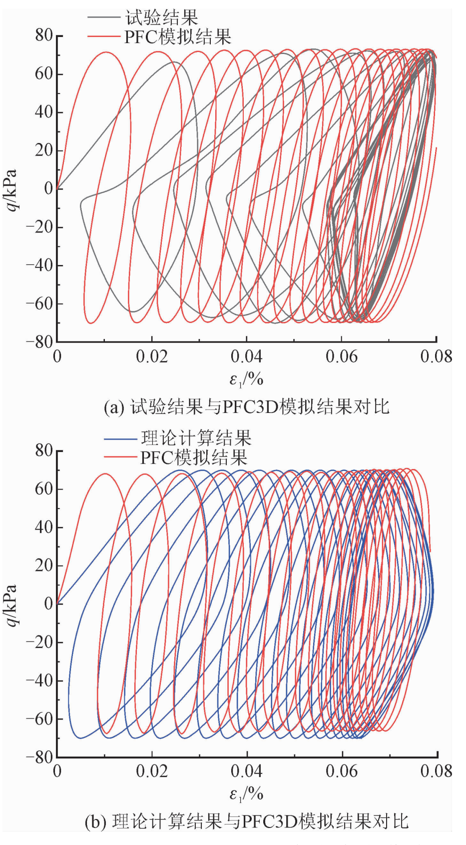


图 13　含泥量为 5% 时的应力应变曲线

Fig. 13　Curves of q-ε_1 with 5% clayey content

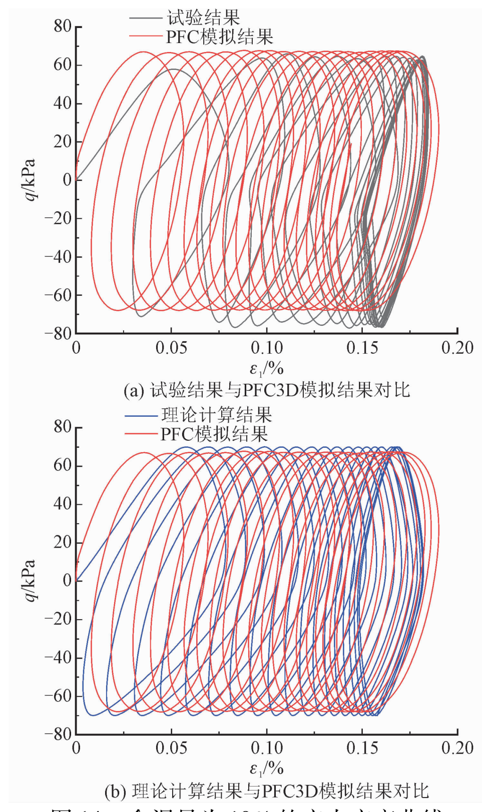


图 14　含泥量为 10% 的应力应变曲线

Fig. 14　Curves of q-ε_1 with 10% clayey content

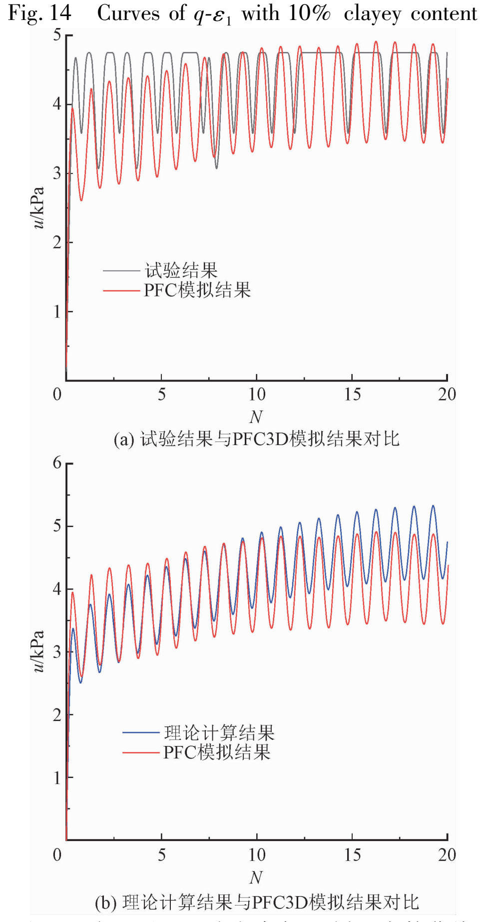


图 15　含泥量 0% 时孔隙水压-循环次数曲线

Fig. 15　Curves of u-N with 0% clayey content

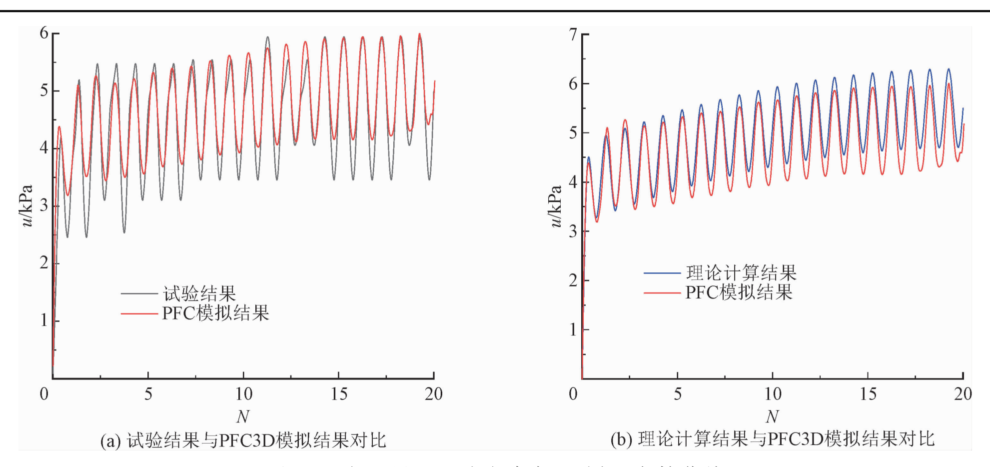


图 16　含泥量 5% 时孔隙水压-循环次数曲线

Fig. 16　Curves of u-N with 5% clayey content

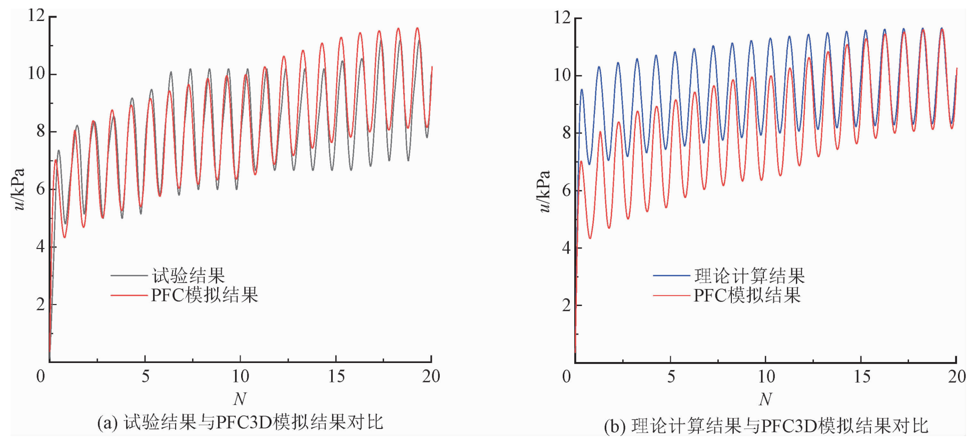


图 17　含泥量 10% 时孔隙水压-循环次数曲线

Fig. 17　Curves of u-N with 10% clayey content

由图 15 ~ 图 17 可知,孔隙水压力 u 与循环次数的数值模拟结果与室内试验和理论计算结果在振幅、大小和发展趋势上都比较吻合,数值模拟的孔隙水压相对值比室内试验大,比理论计算小。孔隙水压均在首次加载时快速升高,随后在循环荷载的作用下循环往复逐步上升,如应力-应变关系一样在前期发展较快,当达到循环稳定即应变发展较慢时,孔隙水压也逐步稳定下来。饱和砂土的含泥量越大,所模拟出的孔隙水压力也会更大一些。这一定程度上是因为饱和砂土中孔隙被泥颗粒填堵住,导致孔隙水压力上升。

4.2　动真三轴数值 CU 试验验证

真三轴模型采用六面体模型,通过用 Fish 语言代码编程实现如下加载:在相应排水条件下,对 PFC3D 数值模型的 3 个方向同时加载至目标最小主应力;保持一个方向的目标最小主应力大小不变,在另外两个方向同时施加应力,直至达到目标中间主应力为止;等待固结完成后,在其中一个方向进行多次加载,保证数值试样不会发生突变,直至数值试样剪切破坏。其余设置和常规三轴模拟试验类似。

由于本研究第 3 节已经表明, 静真三轴条件下, 文献 [1] 理论模型中的中间主应力影响系数取 0.50 较为符合。为了验证动真三轴条件下文献 [1] 理论模型的正确性, 将本研究所建 PFC3D 模型作为数值试验机, 将其模拟结果与理论模型计算结果进行对比。在文献 [1] 理论模型中同样取 $b=0.50$,分别计算含泥量分别为 0%、5% 和 10% 饱和砂土在振动幅值为 70 kPa、振动频率为 1 Hz、中间主应力分别为 250 kPa 和 300 kPa, 最小主应力分别为 150 kPa 和 200 kPa 条件下的固结不排水理论结果, 并与 PFC3D 模拟结果作比较。限于篇幅且结果类似, 本研究只列出中间和最小主应力分别为 300 kPa 和 200 kPa 时不同含泥量下动真三轴应力-应变和孔隙水压力对比结果, 如图 18 ~ 图 20 所示。

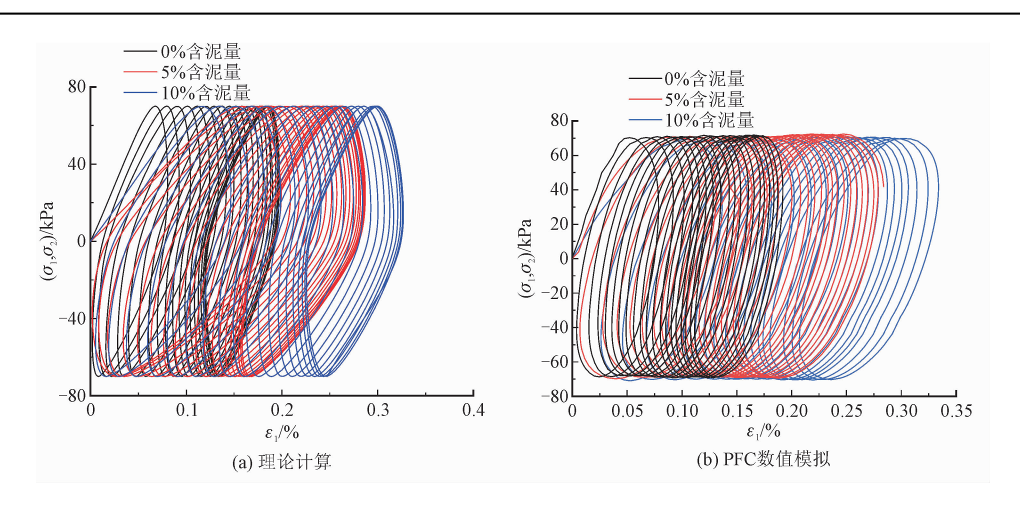


图 18　不同含泥量下的应力-应变关系对比

Fig. 18　Comparisons of the stress vs the strain under different clayey contents

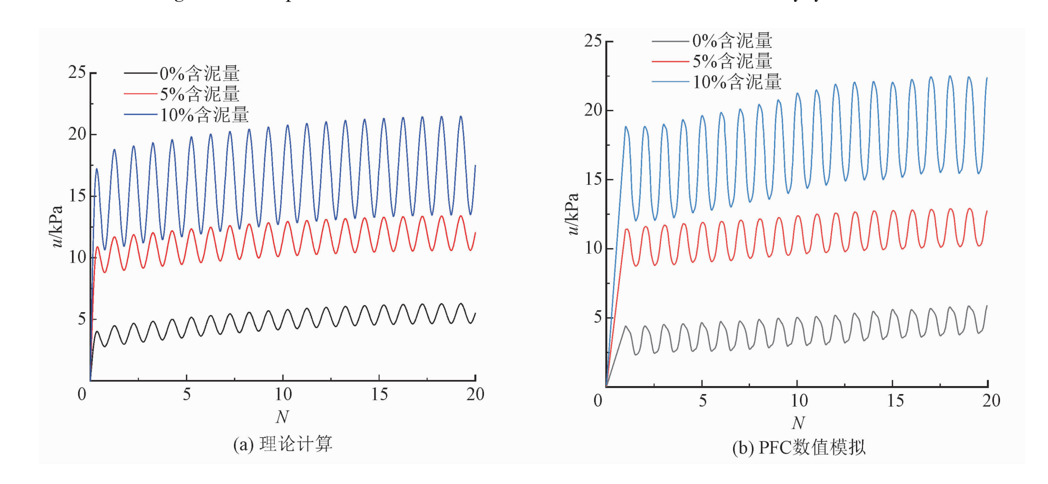


图 19　不同含泥量下的孔隙水压与循环次数关系

Fig. 19　Comparisons of t u-N with different clayey contents

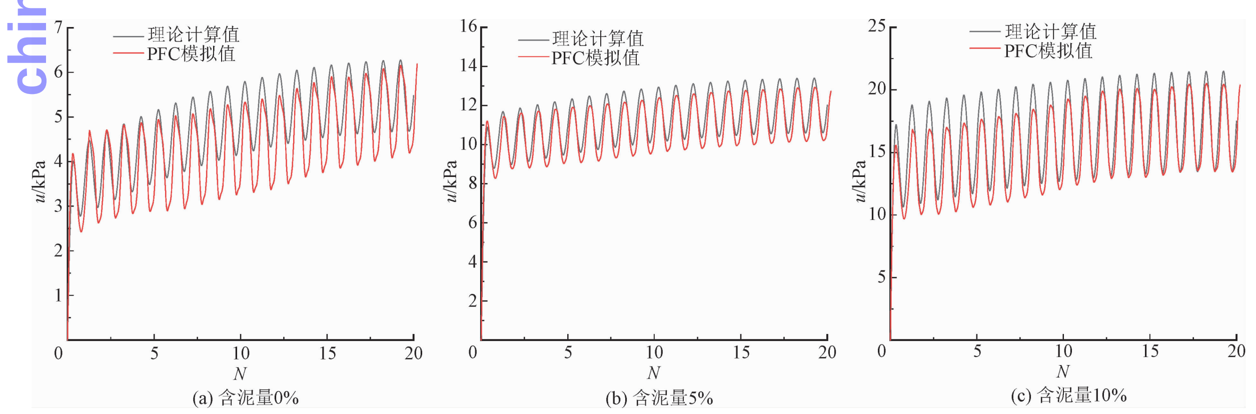


图 20　理论计算值与 PFC 模拟值对比

Fig. 20　Comparisons between theoretical data and PFC simulation data

由图 18 可知：PFC3D 数值模型模拟结果与常规三轴试验结果类似，均表现为在加载前期产生较大的应变、动剪切模量小、滞回圈面积大；随着荷载次数的增加，应变逐步紧缩、动剪切模量增大、滞回圈面积减小并趋于稳定状态；不同含泥量的砂土在循环荷载作用下，其应变的发展具有很大的区别，含泥量越多，应变发展速度越快、动剪切模量更小、滞回圈面积更大。这与常规循环动三轴的表现相同，较

小刚度的泥颗粒可以软化整个试样。

由图19可知,PFC3D的动真三轴数值模拟结果与理论计算结果的孔隙水压发展趋势和变化幅值上都比较吻合,均在加载初期迅速增长,当塑性变形稳定后孔隙水压的发展也趋于稳定。相同条件下数值模拟结果的孔隙水压的绝对值比理论结果偏小,但基本接近;不同含泥量的砂土在相同循环加载条件下孔隙水压的变化在绝对值和振动幅值上都相差较大,含泥量越多孔隙水压的振动幅值和绝对值都更大。

由图20进一步比较可知:含泥量为0%时,理论计算结果比模拟结果要大4.7%左右;含泥量为5%时,理论计算结果比模拟结果要大6%左右;含泥量为10%时,理论计算结果比模拟结果要大9%左右。

5 结 论

对南昌地区饱和砂土进行PFC3D数值试验验证,数值试验为单调荷载作用下不同含泥量饱和砂土外裹柔性膜的常规三轴CD、CU试验和真三轴CU试验,循环荷载作用下动三轴和动真三轴CU试验。具体结论如下。

1)常规三轴CD和CU试验的三方对比结果可知,在固结排水试验中,在相同应力条件下,PFC3D数值模拟结果相比其他两个结果要更大一些,在固结不排水条件下则相反。PFC3D常规三轴数值模拟、室内试验和理论应力-应变、孔隙水压力关系较吻合。

2)真三轴CU试验数值模拟曲线与理论计算曲线的对比结果表明,整体上PFC3D模拟与中间主应力影响系数$b=0.50$时的理论曲线吻合均较好。

3)动三轴CU试验结果表明,不同含泥量饱和砂土的PFC3D数值模拟、室内试验和理论计算结果的应力应变曲线均较为一致,表明了本研究的饱和含泥砂土数值模型的正确性。循环动三轴试验中,其他条件不变时,饱和含泥砂土的应变发展速度会随着含泥量的增加而不断变快,同时孔隙水压力也越大。

4)动真三轴CU试验结果表明,在不同含泥量下,饱和砂土PFC3D数值模拟与理论结果间的应力-应变和孔隙水压力关系比较吻合,再次证明PFC3D模型在研究砂土力学特性时具有较好的适用性。饱和砂土的含泥量越多,应变发展速度越快,动剪切模量更小,滞回圈尺寸、孔隙水压的振动幅值和绝对值都更大。随着荷载次数的增加,应变逐步紧缩、动剪切模量增大、滞回圈尺寸减小并趋于稳定状态。

参考文献

[1] 胡小荣,汪日堂,董肖龙.饱和砂土的三剪弹塑性边界面模型研究(一)——模型理论[J].应用力学学报,2020,37(2):580-588.(HU Xiaorong, WANG Ritang, DONG Xiaolong. Approaches to the triple-shear elasto-plasticity bounding surface model for saturated sands(1)—model theory[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(2):580-588 (in Chinese)).

[2] 胡小荣,董肖龙,汪日堂.饱和砂土的三剪弹塑性边界面模型研究(二)——模型验证及应用[J].应用力学学报,2020,37(3):1283-1292.(HU Xiaorong, DONG Xiaolong, WANG Ritang. Approaches to the triple-shear elasto-plasticity bounding surface model for saturated sands(2)— verification sand applications[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(3):1283- 1292(in Chinese)).

[3] ZHU W C,TANG C A. Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2006,43(2):236-252.

[4] LEE H,MOON T,HAIMSON B C. Borehole breakouts induced in arkosic sandstones and a discrete element analysis[J]. Rock mechanics and rock engineering,2016,49(4):1369-1388.

[5] 李根,唐春安,李连崇.水岩耦合变形破坏过程及机理研究进展[J].力学进展,2012,42(5):593-619.(LI Gen,TANG Chunan, LI Lianchong. Advances in rock deformation and failure process under water-rock coupling[J]. Advances in mechanics,2012,42(5):593-619(in Chinese)).

[6] 冯永,刘杰.筒仓卸粮成拱超压系数的动态演变过程研究[J].应用力学学报,2020,37(3):1036-1042.(FENG Yong,LIU Jie. Dynamic evolution process of overpressure coefficient of silo unloading grain in silo[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(3):1036-1042(in Chinese)).

[7] 杜晓奇,司政,黄灵芝,等.粗骨料颗粒形态和体积分数对混凝土单轴压缩性能的影响研究[J].应用力学学报,2020,37(4):1828-1834.(DU Xiaoqi,SI Zheng,HUANG Lingzhi,et al. Study on the influence of coarse aggregate particle shape and volume fraction on the uniaxial compressive properties of concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(4):1828-1834(in Chinese)).

[8] UCGUL M,SAUNDERS C. Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling[J]. Biosystems engineering,2019,190:58-70.

[9] 周博,黄润秋,汪华斌,等.基于离散元法的砂土破碎演化规律研究[J].岩土力学,2014,35(9):2709-2716.(ZHOU Bo, HUANG Ruiqiu, WANG Huabin, et al. Study of evolution of sand crushability based on discrete elements method[J]. Rock and soil mechanics,2014,35(9):2709-2716(in Chinese)).

[10] 周健,池永.土的工程力学性质的颗粒流模拟[J].固体力学学报,2004,25(4):377-382.(ZHOU Jian, CHI Yong. Simulating soil properties by particle flow code[J]. Acta mechanica solida sinica,2004,25(4):377-382(in Chinese)).

[11] 周健,池毓蔚,池永,等.砂土双轴试验的颗粒流模拟[J].岩土工程学报,2000,22(6):701-704.(ZHOU Jian, CHI Yuwei, CHI Yong, et al. Simulation of biaxial test on sand by particle flow code[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2000,22(6):701-704(in Chinese)).

[12] 周健,廖雄华,池永,等.土的室内平面应变试验的颗粒流模拟[J].同济大学学报(自然科学版),2002,30(9):1044-1050.(ZHOU Jian, LIAO Xionghua, CHI Yong, et al. Simulating plane strain test of soils by particle flow code[J]. Journal of Tongji University(natural science),2002,30(9):1044-1050(in Chinse)).

[13] 周健,王家全,孔祥利,等.砂土颗粒与土工合成材料接触界面细观研究[J].岩土工程学报,2010,32(1):61-67.(ZHOU Jian, WANG Jiaquan, KONG Xiangli, et al. Mesoscopic study of the interface between sandy soil and geosynthetics[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2010,32(1):61-67 (in Chinese)).

[14] LI C X, DONG K J, SHENY S, et al. Particle conveying under microgravity in a vibrating vessel[J]. Advanced powder technology, 2019,30(12):3163-3170.

[15] BADAKHSHAN E, NOORZAD A, BOUAZZA A, et al. Load recovery mechanism of arching within piled embankments using discrete element method and small scale tests[J]. Powder technology, 2020,359:59-75.

[16] SWEIJEN T, HASSANIZADEH S M, ASLANNEJAD H, et al. The effect of particle shape on porosity of swelling granular materials: Discrete element method and the multi-sphere approximation[J]. Powder technology,2020,360:1295-1304.

[17] 王尔豪.饱和密实含泥砂土力学特性的PFC3D颗粒流模拟[D].南昌:南昌大学,2019.

[18] JENSEN R P, BOSSCHER P J, PLESHA M E, et al. DEM simulation of granular media-structureinterface: effects of surface roughness and particle shape[J]. International journal numerical for numerical and analytical methods in geomechanics, 1999, 23(6): 531-547.

[19] 刘海涛,程晓辉.粗粒土尺寸效应的离散元分析[J].岩土力学,2009,30(增刊1):287-292.(LIU Haitao, CHENG Xiaohui. Discrete element analysis of size effect of coarse grained soil[J]. Rock and soil mechanics,2009,30(S1):287-292(in Chinese)).

[20] 周健,史旦达,贾敏才,等.循环加荷条件下饱和砂土液化细观数值模拟[J].水利学报,2007,38(6):697-703.(ZHOU Jian, SHI Danda, JIA Mincai, et al. Micro-mechanical simulation of liquefaction behavior of satu-rated sand under cyclic loading[J]. Journal of hydraulic engineering, 2007, 38(6): 697-703 (in Chinese)).

[21] SUN Z, GERRARD C, STEPHANSSON O. Rock joint compliance tests for compression and shear loads[J]. International journal of rock mechanics and mining science and geomechanics abstracts, 1985,22(4):197-213.

(编辑 黄崇亚)